УДК 622.692.4

ДО ПИТАННЯ РОЗРАХОВУВАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ ГАЗУ В МІЖНИТКОВІЙ ПЕРЕМИЧЦІ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ

М.І. Фик

УМГ «Харківтрансгаз», 61001, м. Харків, вул. Культури, 20 а, тел. (057) 7019358, e-mail: fyk@kntg.com.ua

Предложен аналитический способ учета влияния дроссель-эффекта в перемычке многониточного магистрального газопровода при расчете термобарических параметров внутритрубных потоков газа

To determine the parameters of gas-dynamic flows in the gas pipeline network proposed formula for calculating drosel effect in a short jumper between neighbouring gas pipeline.

Одним із найбільш поширених елементів геометричної складності структури магістральних газопроводів України є наявність паралельно прокладених ниток газопроводів, між якими передбачаються перемички. Перемичкою будемо називати коротку ділянку газопроводу, втратами тиску на якій в більшості випадків можна знехтувати. На перемичках передбачається запірна арматура. При відкритті перемички (запірної арматури на перемичці) окремі нитки газопроводів об'єднуються у єдину газодинамічну систему. При цьому виникають нестаціонарні процеси, що супроводжуються змінами по довжині ниток газопроводу і у часі масової витрати газу, тиску і температури.

Розрахунок основних режимних параметрів транспортування газу в короткому відрізку трубопроводу (перемичка між двома газопроводами) в умовах швидкого відкриття запірного пристрою є досить складною задачею. Її розв'язання потребує серйозних спрощень базової системи диференційних рівнянь і лінеаризації окремих залежностей, що у підсумку призводить до значних похибок кінцевих результатів [1, 2].

Економічні реалії сьогодення потребують більш точного оцінювання витрати газу та енергетичних втрат під час швидких перетоків газу через короткі трубопровідні перемички. Це особливо актуально у разі частих змін режимів роботи кільканиткових газопроводів шляхом відкриття чи закриття перемичок на вході і виході компресорних станцій, а також на перегонах між компресорними станціями.

У роботі [3] нами розроблена математична модель нестаціонарних термогазодинамічних процесів, що супроводжують рух на ділянці розгалуженого газопроводу. Зазначена модель абсолютно придатна для опису нестаціонарних термогазодинамічних процесів на ділянках кільканиткового газопроводу між компресорними станціями. Довжини таких ділянок становлять сто і більше кілометрів. У той же час довжини міжниткових перемичок становлять від кілька сот метрів до кількох кілометрів. Стосовно коротких відрізків або перемичок газопроводів з відносно швидкими змінами тиску, спричиненими інтенсивним початковим збуренням, можна використовувати запропоновану методику тільки з певними, наведеними нижче, змінами аналітичних залежностей.

Відомо, що під час прискорення руху течії газу та великих перепадів тиску між початковим та кінцевим перерізом короткої труби збільшується вплив ефекту Джоуля-Томпсона на термобаричні просторово-часові залежності. У таких випадках не завжди можна застосовувати наближену формулу для коефіцієнта Джоуля-Томпсона, яка рекомендована для теплових розрахунків протяжної ділянки підземного газопроводу [3]

$$D_j = 231600\frac{\sqrt{25-P}}{T^{2,19}}, \text{ К/МПа}; \qquad (1)$$

де: P – абсолютний тиск газу;

T – термодинамічна температура газу.

Класична термодинаміка пропонує таку рекурентну формулу розрахунку інтегрального дросель-ефекту [4]:

$$D_j = \frac{1}{P_1 - P_2} \times \qquad (2)$$

$$\times \int_{P_2}^{P_1} \left\{ \left[\frac{1}{c_p(P,T)} \right] \cdot \left[T \frac{d}{dT} \frac{1}{\rho(P,T)} - \frac{1}{\rho(P,T)} \right] \right\} dP,$$

де: $c_p(P,T)$ – теплоємність газу за сталого тиску;

$\rho(P,T)$ – густина газу, функція тиску і температури.

Для розв'язування рівняння (2) необхідно у підінтегральний вираз спочатку підставити аналітичні залежності густини і теплоємності газу від тиску і температури і виконати диференціювання за температурою.

Використовуємо рівняння стану реального газу у вигляді

$$\frac{P}{\rho} = zRT, \qquad (3)$$

де: z – коефіцієнт стисливості газу;

R – газова стала газу, що залежить від складу його компонентів.

Формулу для коефіцієнта стисливості газу запишемо у вигляді

$$z = 1 - \chi \frac{P}{T^{3,3}}\,, \tag{4}$$

де χ – комплекс величин;

$$\chi = 5{,}5 \cdot \Delta^{1,3}\,, \tag{5}$$

Δ – відносна густина газу за повітрям.

Проводимо диференціювання з врахуванням рівняння стану газу (3) і формул (4) та (5)

$$\frac{d}{dT}\frac{1}{\rho(P,T)} = \frac{d}{dt}\left(\frac{zRT}{P}\right) = \frac{d}{dt}\left[\frac{R}{P}\left(1 - \frac{\chi P}{T^{3,3}}\right)\cdot T\right] =$$

$$= T\frac{R}{P} + 2{,}3\frac{\chi R}{T^{3,3}}\,. \tag{6}$$

Формула (2) з урахуванням аналітичних виразів (3)-(6) приймає вигляд

$$D_j = \frac{1}{P_1 - P_2}\int_{P_2}^{P_1}\left\{\left[\frac{1}{c_p(P,T)}\right]\cdot\left[T\frac{R}{P} + 2{,}3\frac{\chi R}{T^{2,3}}\right] - \right.$$

$$\left. - T\frac{R}{P}\left(1 - \frac{\chi R}{T^{2,3}}\right)\right\}dP\,. \tag{7}$$

Шляхом математичних перетворювань одержуємо

$$D_j = \frac{1}{P_1 - P_2}\int_{P_2}^{P_1}\left\{\left[\frac{1}{c_p(P,T)}\right]\cdot\frac{3{,}3\chi R}{T^{2,3}}\right\}dP\,. \tag{8}$$

Для розрахунку теплоємності газу при сталому тиску вибираємо формулу, що рекомендована нормами технологічного проектування газопроводів.

У результаті математичних перетворень рівняння (8) зводимо до вигляду

$$D_j = \frac{1}{P_1 - P_2}\int_{P_2}^{P_1}\frac{18{,}15\Delta^{1,3}RT^{-2,3}}{1695 + 1{,}838T + 1960T^{-3}P}\,. \tag{9}$$

Виконуємо інтегрування рівняння (9), у результаті одержуємо уточнену математичну модель для визначення коефіцієнта Джоуля-Томпсона

$$D_j = 9{,}26\cdot 10^{-3}\frac{\Delta^{1,3}RT^{0,7}}{(P_1 - P_2)}\times$$

$$\times\left[\ln(1695 + 1{,}838T + 1960\cdot T^{-3}P_1) - \right. \tag{10}$$

$$\left. - \ln(1695 + 1{,}838T + 1960\cdot T^{-3}P_2)\right].$$

Для визначення коефіцієнта Джоуля-Томпсона для заданих значень тиску, температури і складу газу можна також виконати числове інтегрування рівняння (9) для заданого перепаду тиску ΔP.

Порівняємо результати розрахунку коефіцієнта Джоуля-Томпсона за традиційною формулою (1) і запропонованою математичною моделлю (10). Приймаємо абсолютний тиск газу $P = 4\cdot 10^6$ Па, температуру газу $T = 280$ К, відносну густину газу за повітрям $\Delta = 0{,}565$, газову сталу $R = 508{,}4$ Дж/(кг·К), перепад тиску $\Delta P = 10^5$ Па.

Формула (1) дає такий результат:

$$D_j = 231600\frac{\sqrt{25-4}}{280^{2,19}} = 4{,}64 \text{ К/МПа} =$$

$$= 4{,}64\cdot 10^{-6} \text{ К/Па}.$$

Використовуючи запропоновану формулу (10), знаходимо уточнене значення коефіцієнта Джоуля-Томпсона для зазначених вище умов

$$D_j = 4{,}05\cdot 10^{-6} \text{ К/Па}.$$

Таким чином, запропонований метод дав змогу на 15% уточнити значення коефіцієнта Джоуля-Томпсона. Ось чому її використання передбачаємо при розв'язуванні системи газодинамічних рівнянь, що описують як нестаціонарний, так і стаціонарний рух газу у перемичці магістрального газопроводу.

У період швидкого відкриття запірного пристрою на перемичці виникає нестаціонарний процес. Оскільки швидкість розповсюдження хвиль від початкового збурення після відкриття перемички за величиною близька до швидкості звуку в газі, то нестаціонарний процес буде мати характеристичні частоти, що утворюються від додавання прямих та зворотних рухів збурення вздовж перемички. Основна характеристична частота коливань буде дорівнювати [4]

$$f = \frac{L_n}{c_{зв}}\,, \tag{11}$$

де: L_n – довжина перемички,

$c_{зв}$ – швидкість звуку в газі.

Приймаючи довжину перемички 5 км, а розрахункову швидкість звуку в газі 400 м/с, будемо мати частоту f=12,5 Гц. Практика свідчить, що в момент швидкого відкриття перемички виникають, окрім інших, добре відчутні коливання у звуковому діапазоні частот.

Оскільки довжина перемички невелика, то втрати енергії у ній на тертя можуть бути одного порядку зі змінами інших видів енергії газу. Тому при розрахунку перемичок не будемо нехтувати складовою, яка враховує зміну кінетичної енергії газу у рівняннях руху і повної енергії газу.

Описані вище зміни внесені нами у розроблену математичну модель неусталеного руху газу в газопроводі. На базі скоригованої математичної моделі розроблено програмний блок теплогазодинамічного розрахунку перемички магістрального газопроводу.

Дослідження процесів перекачування газу у перемичці, виконані шляхом математичного моделювання, засвідчили, що тривалість нестаціонарних процесів у перемичках магістральних газопроводів відносно невелика і не перевищує однієї-двох годин. Далі процес перекачування газу стабілізується і може розглядатися як квазістаціонарний [4].

Тепловий режим короткої перемички за стаціонарного режиму відрізняється від теплового режиму протяжної ділянки газопроводу і тому також вимагає коригування розрахункових формул.

При стаціонарному режимі руху газу через перемичку рівняння повної енергії газу без урахування профілю траси можна записати у вигляді

$$di + \alpha d\left(\frac{w^2}{2}\right) + dq_e, \qquad (12)$$

де: i – ентальпія газу;

α – поправочний коефіцієнт Коріоліса на нерівномірність розподілу швидкостей газу по перерізу труби;

d – внутрішній діаметр трубопроводу;

w – осереднена за перерізом труби швидкість газу;

q_e – питома енергія газу, що відводиться у навколишнє середовище.

Виразивши повний диференціал ентальпії як функцію тиску і температури та питому енергію газу через повний коефіцієнт теплопередачі, зводимо рівняння (13) до вигляду

$$\frac{K\pi D}{M}(T - T_{гр})dx + \alpha\left(\frac{MzR}{FP}\right)^2 TdT + c_p dT - c_p D_j dP, \qquad (13)$$

де: K – повний коефіцієнт теплопередачі від газу у навколишнє середовище;

M – масова витрата газу у перемичці;

$T_{гр}$ – температура ґрунту на глибині укладання газопроводу;

F – площа поперечного перерізу газопроводу.

Використовуючи рівняння витрати газу у газопроводі при стаціонарному русі, знаходимо тиск газу у довільному перерізі x

$$P = \left(P_н^2 - \frac{M^2 \lambda z R T}{F^2 d} x\right)^{0,5}, \qquad (14)$$

де $P_н$ – абсолютний тиск газу на початку ділянки газопроводу.

Для спрощення приймаємо

$$z = z_{ср}. \qquad (15)$$

Уводимо позначення

$$A = \frac{M^2 \lambda z R}{F^2 d}. \qquad (16)$$

Формула (14) з урахуванням виразів (15) і (16) приймає вигляд

$$P = \left(P_н^2 - ATx\right)^{0,5}. \qquad (17)$$

Шляхом диференціювання рівняння (17) встановлюємо взаємозв'язок між диференціалами тиску dP і лінійної координати dx

$$dP = -\frac{ATdx}{2(P_н^2 - ATx)^{0,5}}. \qquad (18)$$

Рівняння (13) з урахуванням (14), (17) і (18) набуває вигляду

$$\frac{K\pi d}{M}(T - T_{гр})dx + c_p D_j \frac{M^2 \lambda z R}{2F^2 d\left(P_н^2 - \frac{M^2 \lambda z R}{F^2 d} Tx\right)^{0,5}} Tdx + c_p dT + \alpha \frac{(MzR)^2}{F^2\left(P_н^2 - \frac{M^2 \lambda z R}{F^2 d} Tx\right)^2} TdT = 0. \qquad (19)$$

Нами розроблений обчислювальний алгоритм та програмне забезпечення, що дають змогу числовим методом розв'язати рівняння (19) і виявити закономірності зміни температури по довжині при стаціонарному режимі руху газу у перемичці магістрального газопроводу.

Література

1 Щербаков С.Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа / Щербаков С.Г. – М.: Наука, 1982. – 206 с.

2 Фик М.І. Спрощена система газодинамічних рівнянь математичної моделі однониткової лінійної ділянки газопроводу / М.І. Фик // Нафтова та газова промисловість. – 2007. – № 6. – С. 39-43.

3 Середюк М.Д. Визначення пропускної здатності кільканиткового газопроводу при роботі з відкритими перемичками на вході і виході КС / М.Д.Середюк , А.І. Ксенич, М.І. Фик // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2006. – № 2. – С. 110-118.

4. Жидкова М.А. Переходные процессы в магистральных газопроводах / Жидкова М.А. – К.: Наукова думка. 1979. – 256 с.